

УДК 537.312.62:621.313.322

В.В. Шевченко¹, С.Е. Шевченко¹, Р.Я. Шуджан²

¹Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

²Запорожская АЭС

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

На базе анализа современного состояния развития высокотемпературных сверхпроводников, дан краткий обзор развития их практического применения в наиболее энергоемких элементах электротехники, в частности, в электрических машинах и в системах силовой электроники.

энергосбережение, атомная энергетика, силовая электроника, электрические машины

Введение

Постановка проблемы. Современное состояние электроэнергетики и, соответственно, всех отраслей промышленности и транспорта требует немедленного внедрения энергосберегающих технологий: потребность в электроэнергии непрерывно растет, а классические природные источники топлива для тепловых электростанций (уголь, газ, нефть, торф) на грани полной выработки. Атомная энергетика для Украины наиболее перспективна, но также имеет серьезные проблемы – хранение отработанных атомных отходов. Это общая проблема для всего мира. Поэтому непрерывно ведется поиск новых источников энергии, которые сегодня мы называем нетрадиционными: солнечная и ветроэнергетика, энергия гейзеров, приливов, морских и океанических течений, биоэнергетика и т.д. Одновременно следует рассматривать вопросы внедрения технологий и систем с минимальными потерями электроэнергии: применение сверхпроводников и криогенных режимов эксплуатации электрооборудования [1].

Анализ публикаций. Материалы, представленные в статье, базируются на данных классических трудов по теории сверхпроводимости (СП-сти), на данных последних исследований, представленных в материалах конференций и научных журналов. Собраны и проанализированы данные о высокотемпературной СП-сти (ВТСП), о проблемах технологии изготовления ВТСП-в, о технических областях их использования [1 – 5].

Цель статьи. Оценить современное состояние развития ВТСП, определить области электротехники, где наиболее востребовано и перспективно применение этих СП-ов, определить, где в электротехнических устройствах наиболее перспективно их использование, в частности, в каких типах электрических машин, силовых преобразователей и в других элементах электрооборудования.

Основной материал

Десятая часть всей производимой в мире электроэнергии пропадает зря, уходит на нагрев медных и

алюминиевых проводов [1, 2]. Между тем, уже почти 100 лет хорошо известно, как избежать этих потерь. Достаточно использовать СП-ники, обладающие при низких температурах нулевым сопротивлением. Электроток, возбужденный в кольце из СП-го материала, способен годами течь безо всякой внешней подпитки. Как уже указывалось [1], промышленные электроустановки с низкотемпературными сверхпроводниками (НТСП), т.е. проводниками с обязательным охлаждением жидким гелием ($T_K = 4,2$ К) под азотной «рубашкой» для их перехода в СП-щее состояние, нерентабельны из-за высокой стоимости и сложности систем теплозащиты самого гелия. Поэтому шел поиск новых материалов (ВТСП), которые могли бы быть сверхпроводниками при охлаждении только жидким азотом ($T_K = 77$ К).

В начале 1987 года появились сообщения о разработке керамического материала со структурой $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, в котором СП-соее состояние наступает при 93 К в поле с $B_{\text{кр}} = 5,7$ Тл. Такие материалы имеют структуру типа перовскита (минерала CaTiO_3). Плотность тока в системах Y-Ba-Cu-O доведена до 10^4 А/см², что пока меньше, чем в металлических СП-никах. Исследователи считают, что перспективны системы на базе висмута $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, температура перехода которых в СП-состояние достигает 115 К. Появились первые публикации, в которых (но пока в неофициальной форме) приводятся данные о получении ВТСП с $T_K = 250$ К. Открытие ВТСП, критическая температура которых превышает температуру кипения жидкого азота, меняет экономические показатели СП-ковых устройств, так как стоимость хладагента и затраты на поддержание необходимой температуры снижаются в 50 – 100 раз. Кроме того, открытие ВТСП сняло теоретический запрет на дальнейшее повышение критической температуры: от 30 К вплоть до комнатной.

Рассчитаем допустимый ток в СП проводнике. Для защиты СП-ка от перенапряжения и разрушения его включают на внешнее разрядное сопротивление: $R_{\text{раз.}} = U_{\text{пер.доп.}}/I_{\text{раб.}}$, Ом. Постоянная времени затухания тока в СП-проводнике:

$$\tau = L/R_{\text{раз}} = (2 \cdot W \cdot I_{\text{раб}}) / (U_{\text{пер.доп.}} \cdot I_{\text{раб}}^2) = \\ = 2 \cdot W \cdot I_{\text{раб}} \cdot [S(1 - K_3)]^2 / (U_{\text{пер.доп.}} \cdot j_0^2), \text{ с,}$$

где L – индуктивность проводника; S – сечение проводника; K_3 – коэффициент заполнения сечения СП-ком; j_0 – плотность тока в матрице СП; W – номинальная мощность электроприемника, МВА. Допустимый ток перегрева СП-ка

$$I_{\text{пер.доп}} = \frac{U_{\text{пер.доп}} [S(1 - K_3)]^2}{2W} \cdot \int_{4.2}^{\theta} \frac{C_p \gamma}{\rho} d\theta,$$

$C_p = (1 - K_3) \cdot C_{\text{матер}} + K_3 \cdot C_{\text{Nb-Ti}}$ – усредненная удельная плотность материалов СП проводника.

Следует помнить, что появление первой теории, объясняющей природу СП-сти, теории БКШ (Бардина-Купера-Шриффера), кроме положительной, сыграло и отрицательную роль в проведении исследований по СП-мости: по этой теории было доказано, что создание ВТСП невозможно: утверждалось, что температурный диапазон существования «куперовских пар», т.е. максимальная критическая температура существования СП-ков, не может превышать 30 К, т.е. при использовании СП-ков охлаждение жидким гелием обязательно. Поэтому интерес к их промышленному применению резко снизился и в конце 70-х – начале 80-х годов сократились государственные и частные ассигнования на исследование СП-сти [1, 2]. Исследования велись, но в значительно меньших объемах, меньшими коллективами исследователей, со значительно меньшей материальной поддержкой.

К счастью оказалось, что, несмотря на то, что эта теория принесла авторам Нобелевскую премию в 1972 г., она оказалась неточна. Она не смогла теоретически объяснить появление СП-мости в открытых позднее СП-щих материалах. С того времени критическая температура повысилась от 30 до 130 – 150 К. От исходных положений теории БКШ сохранилось только определение: СП-мость – это результат синхронного коллективного движения, при котором каждый электрон очень хорошо «чувствует» своих соседей и подстраивается под их движение, т.е. формирует куперовскую пару [1]. В то же время академик В.А. Гинзбург [4] предложил еще один, отличный от теории БКШ, так называемый экситонный механизм образования куперовских пар. Эти теории предсказывали, что СП-сть может существовать даже при комнатных температурах, т.е. при 300 К.

В настоящее время государственные научно-технические программы разных стран предусматривают широкий комплекс работ, включающих в себя фундаментальные и прикладные исследования, направленные на решение проблемы технической реализации ВТСП-сти. На эти исследования в России, США, Канаде, Японии, Китае выделяются серьезные средства как в рамках национальных, так и в рамках межнациональных программ.

В январе 2001 г. на симпозиуме "Transition Metal Oxides", проходившем в японском городе Сентаи, было сообщено о том, что диборит магния MgB_2 переходит в СП-дущее состояние при рекордно высокой для такого класса соединений температуре 40 К. Это заявление заставило немедленно приступить к изучению этого материала, появилось множество работ различных научных школ, в которых приведены результаты исследований свойств MgB_2 . Может показаться, что температура в 40 К вовсе не такая большая (в настоящее время получены керамики вида $\text{Y}_x\text{Ba}_x\text{Cu}_x\text{O}_x$, сохраняющие СП-дущее состояние вплоть до 150 К). Объясним, почему это соединение (MgB_2) вызвало такой интерес:

1) это простое соединение, как по кристаллографической, так и по электронной структуре, то есть теперь физики-теоретики смогут рассчитать все и попытаются более точно объяснить природу СП-мости, что позволит ее предсказывать в том или ином материале и отказаться от сегодняшней практики обнаружения новых СП-ников методом проб и ошибок или даже случайно;

2) открытие СП-сти MgB_2 подтверждает теорию БКШ и, в то же время, опровергает ее, смещая определенный ею предел температуры от 30 до 40 К. Подтверждением теории, в то же время, было обнаружение изотопического эффекта – одного из первых важных открытий, сделанных сразу же после определения СП-мости MgB_2 . Этот эффект заключается в том, что температура перехода в СП-щее состояние зависит от того, какой изотоп бора используется: B^{10} или B^{11} . Изотопы одного элемента, как известно, имеют идентичное электронное строение, а отличаются лишь массами. Значит, изотопический эффект – это по сути наблюдение зависимости T_k от массы атомов, что и предсказывается теорией БКШ [1];

3) из всех соединений у MgB_2 самая высокая температура перехода в СП-щее состояние (T_k). Это связано с тем, что атомы бора очень легкие, а в теории БКШ сказано, что чем легче атомы, тем дольше сохраняется СП-мость;

4) важно и то, что MgB_2 – давно известное и хорошо изученное вещество. Получение его, в отличие от керамик, не представляет трудностей.

Атомы бора в MgB_2 образуют кристаллическую структуру соединения – шестиугольные "соты", очень напоминающие графитовые плоскости. Отличие от графита в том, что в MgB_2 плоскости находятся прямо одна над другой, а в графите – несколько сдвинуты. Кроме того, есть еще и атомы магния, находящиеся в "сотах". Вычисления показывают, что эти атомы находятся в сильно ионизованном состоянии, близком к Mg^{++} . Будучи положительно заряженными, они как бы "вытягивают" электроны из борных плоскостей в межплоскостное пространство. Это приводит к созданию свободных носителей заряда, т.е. к проявлению металлических свойств MgB_2 и существованию СП-мости.

В настоящее время широкое внедрение ВТСП-в ограничивается:

- 1) требованием сохранения СП-сти при больших плотностях тока;
- 2) необходимостью обеспечения высокой механической прочности и достаточной гибкости проводниковых и кабельных изделий, несущих и вращающихся элементов машин и механизмов;
- 3) необходимостью выдерживать большие магнитные, токовые и центробежные нагрузки, должны легко обрабатываться, иметь стабильные свойства;
- 4) СП-ники должны иметь цену, рентабельную для предприятий.

Инженеры и ученые всех стран отмечают, что в настоящее время основная проблема для внедрения в промышленность СП-никовых электроустановок сложные технологии изготовления СП-щих проводников и кабелей. Работы в этом направлении ведутся непрерывно [3 – 5], и уже можно отметить, что сильноточные СП-ковые технологии вышли на новый уровень.

Наиболее простой способ состоит в размоле, прессовании смеси и отжиге в атмосфере кислорода при температуре 900°C металлических оксидов. Новое вещество образуется в результате химической реакции. Лучшие СП-щие свойства получаются в пленочных образцах, пропускающих ток до 10^6 А/см^2 [1, 2], т.е. в образцах, полученных путем напыления или другим путем получения пленочных покрытий. Провода также производятся методом "порошок в трубе": заготовки из серебряной трубки, заполненной порошкообразным ВТСП-ком, подвергают термомеханической и химической обработке, затем опрессовкой получают ленту с сечением 4-0,3 мм² и длиной до 1000 м. Существуют и другие методы получения ВТСП.

Использование ВТСП-в означает, что возможно создание нового поколения электроэнергетического оборудования (безрезистивного), существенно превосходящего оборудование традиционного (резистивного) исполнения: за счет более высокой эффективности имеем уменьшение в 2 – 3 раза массогабаритных показателей и, соответственно, материалоемкости и энергозатрат на изготовление. Его использование позволит обеспечить повышение надежности и увеличение срока службы, улучшить качество энергосистем, их экологическую чистоту при эксплуатации. Важным аргументом для внедрения СП-вого оборудования в промышленность является снижение капитальной стоимости при его массовом производстве и уже достигнутой цене ВТСП-ков, не превышающей 10 – 15 долл. за 1 кА*м [4]. К настоящему времени прошли успешные испытания опытные образцы электрооборудования со СП-щими обмотками: электромашин мощностью 1 – 10 МВт и системы управления ими; трансформаторы мощностью до 1,5 МВА; участки кабельных линий электропередачи, рассчитанные на мощность до 440 МВА; СП-вые токоограничители и накопители энергии МВА-диапазона.

Для примера, на рис. 1, проведено сравнение габаритов обычных машин и машины со СП-обмотками. Видно, что по габаритам СП-щий двигатель в 9 – 10 раз компактнее обычного, «теплого».

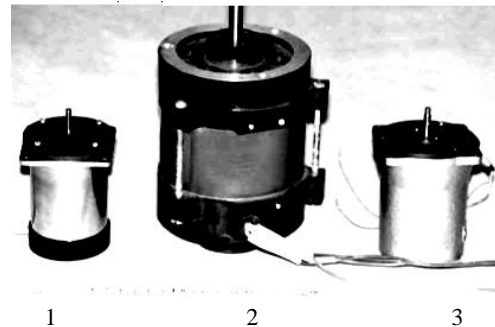


Рис. 1. Сравнение габаритов ВТСП-ого и традиционных электродвигателей:

- 1 – электродвигатель 100 Вт со ВТСП-ми обмотками;
2 – обычный 100 Вт; 3 – обычный 12 Вт

Мы не считаем, что процесс вхождения нового электрооборудования будет взрывным, скорее, он будет эволюционным, но с заметной скоростью нарастания [1]. Широкое применение СП-вого оборудования, как при генерации электроэнергии, так и при ее транспортировке и потреблении, позволит увеличить эффективность использования электроэнергии на 5 – 7%, а следовательно, практически на эту же величину сократить потребление первичных энергоносителей, которым является органическое топливо. Это снизит выброс парниковых газов в атмосферу, т.е. общую нагрузку на окружающую среду, сократит уничтожение природных запасов газа, угля, нефти, торфа.

Внедрение новой технологии использования СП-ков непосредственно коснется всех областей, где используется электротехническое оборудование, – электроэнергетики, машиностроения, металлургии, горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, наземного, морского и воздушного транспорта, атомной промышленности. Очевидно, что наиболее перспективно комплексное использование СП-вого оборудования, например, полностью укомплектованные электростанции, технологические комплексы, электроприводные системы, системы электроснабжения. Это снижает стоимость затрачиваемой электроэнергии, повышает надежность работы оборудования и улучшает экологическую ситуацию. Но и единичные виды СП-го оборудования: трансформаторы, кабели, электродвигатели и генераторы могут улучшить ситуацию в существующих энергосистемах, увеличить их устойчивость, надежность и пропускную способность. В индустриально развитых странах существуют специальные правительственные программы по развитию и применению СП-щих технологий в различных областях деятельности. Такие программы есть в США, Японии, в

Европейском сообществе, к их реализации привлекается частный капитал будущих производителей и пользователей оборудования. Например, согласно американской программе "СП-мост для электроэнергетики 1996 – 2000 гг.", указано, что с 2010 – 2015 гг. электромашиностроительные фирмы США планируют массово выбросить на мировой рынок дешевое, компактное, эффективное и надежное СП-овое оборудование. Это период наиболее активной замены отработавшего свой ресурс электроэнергетического оборудования. Такая коммерческая «атака» призвана обеспечить глобальное стратегическое преимущество промышленности США в XXI в.

Отметим наиболее интересные направления промышленного использования СП-ков.

1. Турбогенераторы. Применение СП-ников в электромашиностроении позволяет уменьшить массу и габаритные размеры электрических машин, увеличить предельную мощность и КПД турбогенераторов, получить электродвигатели с минимальным моментом инерции, с малым временем реверса, со специальными характеристиками. СП-щие системы возбуждения могут увеличить КПД генераторов большой мощности до 99,5%, в то время, как у обычных турбогенераторов он не более 98,6%. Ежегодная экономия топлива при этом составит 1%. Наиболее перспективно применение СП-ти в турбогенераторах большой мощности, где удастся достигнуть того, что при других технических решениях получить невозможно: уменьшить массу и габариты машины при сохранении мощности. Уже освоены энергоблоки мощностью 500 и 800 МВт, на стадии изготовления находятся блоки мощностью 1500, а для более далекой перспективы (к 2010 г.) анализируются возможности доведения единичной мощности турбогенератора до 2500 – 3000 МВт на базе обычной конструкции в четырехполюсном исполнении. В обычных машинах это уменьшение всегда связано с увеличением потерь и трудностями обеспечения высокого КПД. Модельные и первые промышленные испытания показали, что в турбогенераторах со СП-щими обмотками возбуждения и статора массу можно уменьшить в 2 – 2,5 раза. В тоже время, из-за отсутствия потерь в роторе, КПД увеличивается примерно на 0,5% и приблизится для крупных турбогенераторов к значению 99,3%. Повышение КПД турбогенераторов, даже на 0,1%, компенсирует затраты, связанные с созданием генераторов, на 30%. В этих условиях экономия энергии, получаемая за счет снижения потерь, очень быстро оправдывает те затраты, которые вкладываются в создание новых СП-х машин. При этом нужно решать проблемы подбора новых материалов, разработки соответствующих технологий, обеспечения высокой надежности [3].

2. Линии электропередач и кабельные сети. Экономически рентабельными СП-ковые линии электропередач могут стать только при передаче по ним большого количества энергии. В 2005 г. группа

китайских разработчиков (CAS, IEE, TIPC) и компания American Superconductor объявили об успешной демонстрации 76-метрового 3-фазного кабеля с теплым диэлектриком в действующей сети. С декабря 2004 года по апрель 2005 года данный кабель с напряжением 6,6 кВ питал заводы компании Changtong Power Cable в городе Байин (Китай). Для подвода электроэнергии к одному из кварталов Детройта (США) был проложен СП-щий кабель; примеру Детройта собираются последовать и некоторые другие американские города.

К середине 80-х годов 20 века стали отмечать разрыв между пропускной способностью обычных кабелей и растущей потребностью в передаваемых мощностях. Одним из направлений решения этой задачи стало применение НТСП-кабелей. Однако огромным минусом, сдерживающим применение этих кабелей, было обязательное условие охлаждения жидким гелием, т.к. НТСП-кабели работали только при очень низкой температуре (жидкий гелий $T_K = 4,2$ К под защитой жидкого азота $T_K = 77$ К). Открытие в 1986 году Беднорцем и Мюллером ВТСП, имеющих рабочую температуру выше 77 К, дало новый толчок развитию кабелей, использующих явление СП-сти [3].

С полной уверенностью можно сказать, что ВТСП-кабели, по сравнению с обычными, обладают меньшими потерями, большей пропускной способностью даже при снижении напряжения. При одинаковой мощности по сравнению с обычным кабелем, ВТСП-кабель более компактен и имеет низкий вес, что облегчает транспортировку и монтаж, для него требуется меньшее количество муфт, уменьшается площадь прокладки, они экологичны и пожаробезопасны. Особенность внутреннего охлаждения ВТСП-кабелей (с помощью только жидкого азота) позволяет избежать нагрева электрической изоляции.

Японская компания The Furukawa Electric Co, в сотрудничестве с организацией по развитию новых энергетических и промышленных технологий - New Energy and Industrial Technology Development Organization, создала СП-щий материал для производства силовых кабелей, способных передавать мощности, в 100 раз превышающие мощности, передаваемые по традиционным кабелям с медными жилами. Важно, что стоимость производства этих кабелей почти не превышает стоимость производства обычных кабелей. При этом следует учитывать, что 90% стоимости кабеля – это стоимость ВТСП-материала. Жилы, образующие новый кабель, выполнены из тонкой плёнки ВТСП-щего материала типа иттрия, слоями наложенного на никелевую основу. Двадцать таких СП-ков были соединены вместе в экспериментальный кабель длиной 1 м, с пропускной способностью до 1450 А. В настоящее время компанией Furukawa ведутся работы по созданию СП-го кабеля длиной 500 метров. Обычно такие кабели достаточно дорогие, т.к. в таких СП-ках присутствует большое количество серебра. Компания планирует,

что изготовленный ею кабель будет готов примерно к 2015 г., к тому времени, когда в Японии планируется модернизировать большинство высоковольтных силовых линий, проложенных в 70-е и 80-е годы. Furukawa собирается предложить свой кабель на рынок для электроэнергетических компаний, как в Японии, так и за рубежом, для передачи больших объемов дешёвой электроэнергии. Есть основания полагать, что в ближайшие годы разработчики и производители СП-ковых материалов разных стран добьются снижения цены в несколько раз. Тогда и станет очевидной выгода разработки и применения ВТСП-кабелей. На рис. 2 и 3 приведены два варианта возможного исполнения кабелей с ВТСП-жилой: с холодным и с теплым диэлектриками. Несмотря на простоту конструкции, монтаж такой линии сопряжён со значительными трудностями: надо обеспечить герметичность кабеля, научиться собирать его из отдельных коротких отрезков; разработать рефрижераторы, концевые устройства и другое оборудование, необходимое для стабильной работы таких линий передач.

Наиболее перспективные направления внедрения ВТСП-кабелей:

- 1) глубокие вводы в мегаполисы (например, Москва, Санкт-Петербург, Киев и т.д.) и крупные энергоёмкие комплексы (металлургические, нефтеперерабатывающие и т.д.), что позволит не только увеличить передаваемую мощность, но и отказаться от подстанций высокого напряжения в пользу среднего;
- 2) связи между энергетическими системами, силовоточные токопроводы;
- 3) ЛЭП постоянного тока;
- 4) переключки между воздушными ЛЭП при прохождении водных преград (изоляция обычных кабелей в данных условиях может перегреваться, что уменьшает их пропускную способность на 30 – 40%).



Рис. 2. Конструкция ВТСП-кабеля с холодным диэлектриком: 1 – жидкий азот; 2 – жидкий азот; 3 – ВТСП-токопроводящая жила; 4 – диэлектрик; 5 – ВТСП-экран; 6 – криостат; 7 – оболочка



Рис. 3. Конструкция ВТСП-кабеля с теплым диэлектриком: 1 – жидкий азот; 2 – ВТСП-токопроводящая жила; 3 – криостат; 4 – оболочка; 5 – экран

В кабеле с холодным диэлектриком (рис. 2) элемент кабеля окружен коаксиальным СП-щим слоем, предназначенным для экранировки магнитного поля. Диэлектрик, «пропитанный» жидким азотом, располагается между токопроводящей жилой (из ВТСП-материала) и внешним экранирующим слоем.

Преимуществом такой конструкции является устранение потерь от переменного тока, вызванных воздействием магнитного поля, а также вихревыми токами, наведенными в металлических частях соседнего оборудования. В кабелях с теплым диэлектриком (рис. 3) нет такого СП-го слоя. Данная конструкция требует меньшего расхода СП-го материала, применяются обычные изоляционные материалы, поэтому стоимость этих кабелей существенно ниже. ВТСП-кабели всё чаще устанавливаются в действующие сети. Стоит ожидать, что лет через 5 они будут применяться наряду с обычными кабелями, постепенно вытесняя их из электроэнергетики, как устаревшие.

Помимо других сложных вопросов, возникает необходимость в существенном повышении номинального напряжения. Применение чистых металлов, охлажденных до 15 – 20 К, а главное, СП-ников представляется одним из возможных путей развития будущей электротехники больших мощностей.

3. Поезда на магнитной подушке – наиболее перспективное применение СП-ников для скоростных поездов. Стоимость сооружения пути длиной 500 км обойдется в 1,5 – 4,5 миллиардов долларов. Стоимость самих поездов составит не более 10% от общей суммы затрат, а система охлаждения всего 1%.

4. Использование СП-ков для получения сверхсильных постоянных магнитных полей. СП-щий соленоид, в отличие от обычного, не нуждается во внешнем источнике питания, поскольку однажды возбуждённый в нём ток не затухает.

Сильные электромагнитные поля особенно важны в установках для получения управляемой термоядерной реакции: плазма может удерживаться во взвешенном состоянии в мощных электромагнитных полях. Необходимые для этого магнитные поля столь велики, что их создание экономически оправдано только при использовании СП-щих магнитов.

5. СП-щие накопители энергии с охлаждением жидким N_2 обошлись бы на 3% дешевле, чем обычные, а капитальные затраты уменьшаются еще на 5%.

6. В современной электротехнике все шире используется явление **криопроводимости**, т. е. достижение металлами весьма малого значения удельного сопротивления при криогенных температурах, но без перехода в СП-щее состояние. Такие металлы называются криопроводниками. Наиболее часто это чистые Cu и Al (марки А999 с 0,001% примесей), Вг (0,1% примесей).

Применяются криопроводники в основном для изготовления жил кабелей, проводов, работающих при температурах жидкого H_2 ($-252,6^\circ C = 20,4\text{ K}$), Ne ($-245,7^\circ C = 27,3\text{ K}$) и N_2 ($-195,6^\circ C = 77,4\text{ K}$).

Применение криопроводников, вместо СП-ников, в электротехнических устройствах может иметь свои преимущества. Использование в качестве хладагента жидкого H_2 или жидкого N_2 (вместо жидкого гелия, который значительно дороже других хладагентов) упрощает и удешевляет выполнение тепловой изоляции устройства и уменьшает расход мощности на охлаждение. При случайном повышении температуры или магнитной индукции свыше значений, соответствующих переходу СП-ника в нормальное состояние, СП-мость будет нарушена. Это приведет к внезапному освобождению большого количества энергии. Для криопроводящей цепи такой опасности нет, так как повышение температуры может повлечь за собой лишь постепенное, плавное увеличение сопротивления.

Выводы

1. Современное состояние электроэнергетики, промышленности, транспорта требует немедленного внедрения энергосберегающих технологий и систем с минимальными потерями электроэнергии. Применение сверхпроводников и криогенных режимов эксплуатации электрооборудования – одно из наиболее перспективных направлений развития электротехнических устройств и, в первую очередь, электрических машин.

2. До настоящего времени нет окончательно сформированной физической теории, объясняющей явление СП-сти. Необходимо продолжать работы по созданию единой теории, объясняющей это явление, что поможет целенаправленно получать новые ВТСП-ки.

3. Практически важным направлением в развитии практической СП-сти является развитие существующих и создание новых технологий изготовления СП-ков.

4. Наибольший экономический эффект следует ожидать от использования СП-сти в электромаши-

ностроении при изготовлении крупных электрических машин. Целесообразно использовать явление СП-сти или криогенного охлаждения проводников для всего комплекса оборудования, входящего в систему обеспечения работы электрического двигателя или генератора.

5. Среди ближайших технических задач, входящих в круг работ по практическому использованию СП-сти и криогенного охлаждения, является установление рентабельных областей применения каждого из этих явлений.

Список литературы

1. Шевченко В.В., Гавриш А.Ю. Современное состояние и перспективы применения сверхпроводников в электроэнергетике // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2005. – Вып. 5 (45). – С. 194-204.
2. Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Мамиконянц Л.Г. Проблемы генераторостроения на всемирном электротехническом конгрессе // Электричество. – 1977. – № 12. – С. 37-41.
3. Черноплеков Н.А., Чубраева Л.И. Сверхпроводниковые обмоточные материалы для современной электроэнергетики // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. – С.-Пб.: ОЭЭП РАН. – 2003. – Вып. 5. – С. 27-31.
4. Черноплеков Н.А. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения // Вестник РАН. – 2001. – Т. 71, № 4. – С. 303-319.
5. Кузьмин В.В. О нетрадиционном сценарии развития электроэнергетики в 21-м веке // Новини енергетики. – 1999 – № 2. – С. 47-51.

Поступила в редколлегию 5.12.2006

Рецензент: проф. В.П. Соляник, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.